

ЭПТ 2015



ACED 2015

УДК 62-83:621.314.5

## 7.5. ЭЛЕКТРОМАШИНО-ВЕНТИЛЬНАЯ СИСТЕМА В СОСТАВЕ КОГЕНЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ

## ELECTRIC MACHINE SWITCH SYSTEM AS PART OF THE COGENERATION POWER PLANT

**Хитров Александр Иванович**, канд. техн. наук, доцент каф. «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ «Псковский государственный университет», Россия, 180000, г. Псков, пл. Ленина, 2. E-mail: khitrov-pscov@mail.ru, Тел.: +79210046497

**Хитров Андрей Александрович**, инженер каф. «Электропривод и системы автоматизации» ФГБОУ «Псковский государственный университет», Россия, 180000, г. Псков, пл. Ленина, 2. E-mail: khitrov.aa@gmail.com, Тел.: +79532460936

**Alexander I. Khitrov**, Cand. Sc., Pskov State University, 180000, Lenina square, 2, Pskov, Russia. E-mail: khitrov-pscov@mail.ru, Ph.: +79210046497

**Andrey A. Khitrov**, Engineer, Pskov State University, 180000, Lenina square, 2, Pskov, Russia. E-mail: khitrov.aa@gmail.com, Ph.: +79532460936

**Аннотация:** Рассматривается возможность применения вентильного двигателя с постоянными магнитами в когенерационной установке малой мощности с роторно-лопастной машиной и внешним подводом тепла (Стирлинг-машина). Приводятся результаты имитационного моделирования в среде Matlab-Simulink и результаты экспериментальных исследований на специальном стенде.

**Abstract:** Application of brushless permanent magnet motor in the autonomous low-power energy supply system with rotary-vane (swing-piston) external combustion engine (Stirling engine type) is considered. Matlab-Simulink models imitation and experimental results are given.

**Ключевые слова:** автономная система электроснабжения; роторно-лопастная машина с внешним подводом тепла; синхронная машина с постоянными магнитами; активный выпрямитель; корректор коэффициента мощности; инвертор.

**Key words:** autonomous electric energy supply system; rotary-vane external combustion engine; permanent magnet synchronous machine; active front end converter; power factor corrector; inverter.

Для повышения эффективности использования топливно-энергетических ресурсов в стране ставятся задачи создания автономных систем энергоснабжения (АСЭ), которые обеспечивают при сжигании органического топлива одновременное получение как тепловой энергии, так и электрической энергии (когенерационные установки). Применение когенерации не ново, так как этот принцип использовался в теплоэлектроцентралях (ТЭЦ). Анализ данных, приведенных в [1], позволяет сделать вывод, о том, что для малой когенерации в настоящее время в основном применяются поршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС).

В Псковском государственном университете (ПсковГУ) в настоящее время ведутся работы по созданию энергоэффективной когенерационной установки малой мощности (КГУМ) на основе роторно-лопастной машины с внешним подводом тепла (РЛМ). Ставится задача создания энергетической установки с тепловой мощностью 50-100 кВт и 10-15 кВт электрической мощности трех фаз переменного тока.

Реализуя процесс совместного производства тепловой и электрической энергии (миниатюрная тепло- и электростанция), КГУМ позволит повысить эффективность котельных в ЖКХ, а при создании автономных систем энергообеспечения обеспечить энергией автономных потребителей. Такие установки могут дать технико-экономический эффект при применении не только природных, но и произведённых энергоносителей: сжатого воздуха, газа, водяного пара котельных установок и других парогенераторов, горячей воды, продуктов переработки органического топлива и биомассы. Силовая часть экспериментального образца КГУМ, содержит парогенераторную установку с РЛМ, электрический генератор, жестко соединённый с одним из валов, систему теплообменников, принудительного охлаждения и отвода теплоносителя.

Несмотря на достаточно длительный период времени, прошедший с момента появления идеи Р.Стирлинга (сентябрь 1816 г.) о создании поршневого двигателя с внешним подводом теплоты (ДВПТ), до сих пор отсутствуют такие двигатели малой мощности до 15 кВт

(электрическая мощность КГУМ) адекватных размеров и стоимости [1]. Принцип работы двигателя Стирлинга привлекает изобретателей с позиции экологически чистого преобразования тепловой энергии в механическую работу и возможности вторичного использования тепловой энергии производственных процессов.

В данной статье рассматривается электрическая часть КГУМ с применением общепромышленных электрических машин (ЭМ) и стандартных преобразователей частоты (ПЧ).

Проведенный анализ различных типов ЭМ, применяемых в автономной энергетике, позволяет рекомендовать использовать в КГУМ синхронные машины с постоянными магнитами (СМПМ). Такие общепромышленные ЭМ уже сейчас выпускаются в очень большом диапазоне мощностей, от единиц ватт до десятков киловатт. В автономной электроэнергетике СМПМ, постоянно готовые к работе при соединении с валом приводного движителя, несмотря на свою высокую стоимость, набирают всё большую популярность. Особенно это касается СМПМ с высококоэрцитивными магнитами (например, неодим-железо-бор, Ne-Fe-B).

В таблицах 1 и 2 представлены некоторые типы отечественных трёхфазных ЭМ на номинальные скорости 2000 об/мин и 3000 об/мин соответственно [2-3]. Известно, что наиболее общим показателем для различных типов ЭМ является удельная мощность энергии магнитного поля, сконцентрированная в воздушном зазоре ЭМ, а масса на единицу мощности служит основным фактором, характеризующим технический уровень ЭМ и массогабаритные показатели энергетической установки. В этих таблицах представлены расчетные значения коэффициентов электромеханической  $q$  (Н·м/кг) и механоэлектрической эффективности  $K_a$  (А/кг) СМПМ, имеющиеся в распоряжении авторов. Между коэффициентами существует следующая взаимосвязь:

$$q = \hat{E}_a \times \hat{E}_l,$$

где  $K_m$  (Н·м/А) – постоянная электромагнитного момента.

Максимальный вес СМПМ, представленных в таблицах ( $m = M_{d0} / q$ ), на мощность 42 кВт составляет не более 170 кг (6ДВМ 300L), а вес СМПМ мощностью 15 кВт менее 70 кг. Для сравнения тихоходные ветрогенераторы НПО «ЭРГА» (г. Калуга) номинальной мощностью 30 кВт весят 550 кг.

КПД СМПМ находится в диапазоне 0,88-0,92. Напряжение на звене постоянного тока составляет 520В, что позволяет использовать в составе КГУМ стандартные трёхфазные ПЧ, имеющие доступ к

подключению через звено постоянного напряжения (DC-DC).

Таблица 1.

Тип	$P_{2n}$ кВт	$M_{d0}$ Н·м	$K_a$ А/кг	$q$ Н·м/кг
ВЭМЗ (г. Владимир)				
ДВУ2М165S	1,1	7	0,21	0,33
ДВУ2М215S	2,8	17	0,11	0,4
ДВУ2М215М	3,8	23	0,13	0,41
ДВУ2М215L	6,3	38	0,14	0,55
2ДВУ165L	3,8	23		1,00
2ДВУ215L	11,7	70		1,25
2ДВУ265S	16	100		1,16
2ДВУ265L	28	170		1,29
ЧЭАЗ-ЭЛПРИ (г. Чебоксары)				
5ДВМ165L	3,8	23		0,77
5ДВМ215S	5,8	35		0,83
5ДВМ215М	7,8	47		1,00
5ДВМ215L	11,7	70		1,08

Таблица 2.

Тип	$P_{2n}$ кВт	$M_{d0}$ Н·м	$K_a$ А/кг	$q$ Н·м/кг
ОАО «Электропривод» (г. Киров)				
ДБМ-142-11-3	2,7	11	0,59	0,77
ДБМ 142-16-3	4	16	0,76	0,9
ДБМ 192-18-3	4,5	18	0,55	0,76
ДБМ 192-27-3	6,5	27	0,66	0,94
ДБМ 192-36-3	9	36	0,75	1,08
ЧЭАЗ-ЭЛПРИ (г. Чебоксары)				
6ДВМ 215S	8,5	35	0,81	0,83
6ДВМ215L	17	70	1,04	1,08
6ДВМ300А	17	70	0,64	0,67
6ДВМ300S	25	100	0,77	0,80
6ДВМ300М	32	130	0,86	0,90
6ДВМ300L	42	170	0,99	1,03

В таблице 3 представлены данные бесщеточных синхронных генераторов (СГ) серии БГ и трёхфазных синхронных генераторов серии ЕСС с частотой вращения вала 1500 (об/мин) и самовозбуждением. Обратим внимание на массогабаритные показатели таких отечественных ЭМ и низкий коэффициент  $K_a$ .

Таблица 3.

Тип	$P_{2n}$ кВт	$U$ , В	$K_a$ А/кг	$m$ , кг
БГ-16-4	16	400	0,16	185
БГ-30-4	30	400	0,22	250
БГ-60-4	60	400	0,31	350
ЕСС-52-4	5,0	400	0,07	125
ЕСС-62-4	12	400	0,09	238
ЕСС-81-4	20	400	0,10	349
ЕСС-82-4	30	400	0,13	420
ЕСС-91-4	50	400	0,15	590
ЕСС5-92-4	60	400	0,20	540

В таблице 4 представлен ряд СМПМ и бесщеточных синхронных генераторов отечественных производителей (10-40 кВт), применение которых возможно в разрабатываемой КГУМ.

Таблица 4.

Тип	$P_{2н}$ кВт	N об/м	M Н·м	$K_a$ А/кг	m кг
2ДВУ215L	11,7	2000	70		56
2ДВУ265S	16	2000	100		86
2ДВУ265L	28	2000	170		132
5ДВМ215L	11,7	2000	70		65
6ДВМ215L	17	3000	70	1,04	65
6ДВМ300А	17	3000	70	0,64	105
6ДВМ300S	25	3000	100	0,77	125
6ДВМ300М	32	3000	130	0,86	145
6ДВМ300L	42	3000	170	0,99	165
ЕСС-62-4	12	1500	75	0,09	238
ЕСС-81-4	20	1500	130	0,10	349
БГ-16-4	16	1500	105	0,16	185

Массогабаритные и энергетические показатели СМПМ в значительной степени зависят от свойств используемых постоянных магнитов (ПМ) [2-3]. При улучшении свойств и характеристик ПМ для ЭМ (большая индукция в рабочем зазоре, оптимальная конструкция, коррозионная и тепловая стойкость в агрессивных средах) показатели энергетической эффективности СМПМ могут улучшиться. Большинство СМПМ, выпускаемых серийно промышленностью, имеют достаточно высокую скорость вращения вала в номинальном режиме работы, которая порой недостижима при работе паровых РЛМ и ветроэнергетических установок. В случае

применения низкоскоростного двигателя снижается значение мгновенной э.д.с. фазных обмоток в генераторном режиме работы. Кроме того, так как скорость вращения вала приводной машины (двигателя) переменная, а в ряде случаев необходимо и применение режимов предварительного запуска агрегата для выхода на номинальный режим, то эти обстоятельства должны быть учтены при проектировании электрической части КГУМ.

Проведенный авторами поиск технических решений по созданию электрической части КГУМ, удовлетворяющих следующим техническим требованиям: энергетическая установка должна обеспечивать как режим генерации электрической энергии, так и обеспечивать режим запуска (старта) роторно-лопастной машины (РЛМ) для выхода на номинальные режимы работы; низкоскоростной двигатель с переменной частотой вращения вала до 500 об/мин; элементы механического (редукторы) и электрического мультиплексирования (трансформаторы) не применяются, привёл к техническому решению, представленному на рис.1[4].

В составе КГУМ можно выделить две подсистемы: использование и управление потоками тепловой энергии (тепловая подсистема с системой управления РЛМ СУ 6) и система получения, преобразование электрической энергии с вращающейся части (вала) СМПМ (электрическая подсистема).

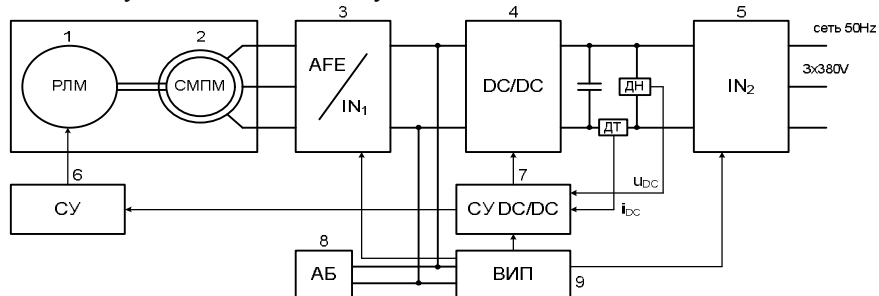


Рис. 1. Электрическая часть КГУМ

Электрическая часть КГУМ включает в свой состав: СМПМ(2), два трёхфазных вентильных преобразователя AFE/IN1(active front end)/(inverter) (3) и IN2 (5), корректор коэффициента мощности DC/DC (ККМ) (4), дополнительный блок аккумуляторных батарей (8) (АБ), вторичные источники питания (ВИП)(9), необходимые для обеспечения автономной работы КГУМ, систему управления скоростью вращения вала РЛМ (6) (СУ), взаимосвязанную с системой управления ККМ (7)(СУ DC/DC). Последняя реализуется на основе микроконтроллера и применением датчиков обратной связи по току

(ДТ) и напряжению (ДН). Все силовые элементы являются стандартными техническими изделиями, кроме блока (4) и системы управления им (7), которые промышленностью на требуемую мощность в настоящее время не выпускаются.

Проведенные натурные испытания по исследованию режимов работы СМПМ в качестве генератора на экспериментальный стенде, показали, что при использовании СМПМ типа ДВУ2М (ПМ - ферриты стронция), работающих в режиме генератора, коэффициент передачи по э.д.с. находится в пределах  $K_e = (0,6-3,0)В \cdot с/рад$ ,

что обеспечит для СМПИМ ДВУ2М 215L при скорости вращения двигателя 500 об/мин величину э.д.с. на уровне, не превышающем 150 В [5]. Такое входное переменное напряжение автономной сети после выпрямления схемой Ларионова не обеспечивает устойчивую работу трёхфазного инвертора (5) для создания на его выходе переменного напряжения промышленной частоты. Для низкоскоростного двигателя (до 500 об/мин), необходим мультипликатор. Такое устройство может быть механическим (редуктор), электрическим (повышающий трансформатор) или (DC/DC конвертор или корректор коэффициента мощности – ККМ).

Разработаны модели в среде Matlab-Simulink-SimPowerSystems и проведены натурные эксперименты при работе СМПИМ в режиме генератора с редуктором, без него, но с повышающим трансформатором и трёхфазным

выпрямителем (рис.2). Исследования показали работоспособность такого решения, однако с ростом необходимой мощности КГУМ существенно возрастают массогабаритные показатели установки (в первую очередь за счёт силовых трёхфазных трансформаторов).

Дальнейшие исследования в настоящее время направлены на создание КГУМ с ККМ на мощность (10-15) кВт. Разработана Matlab-модель для исследования режимов ККМ (рис.3), создаётся экспериментальный стенд на основе ПЧ UNIDRIVE для проверки адекватности результатов, полученных на модели с целью оптимизации параметров электрической части ККМ и проверки работоспособности её системы управления в различных режимах.

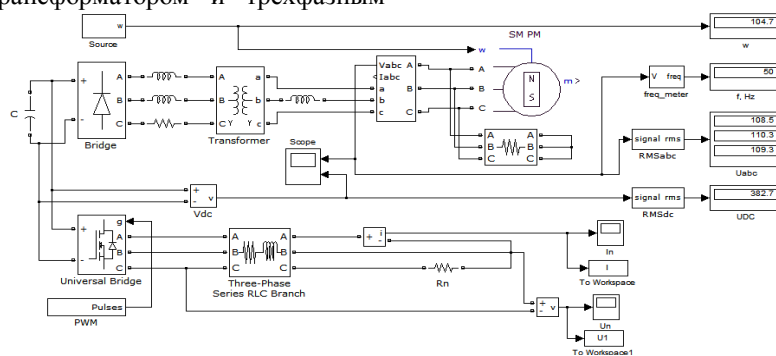


Рис. 2. Matlab-модель работы ДВУ2М в режиме генератора с повышающим трансформатором и выпрямителем.

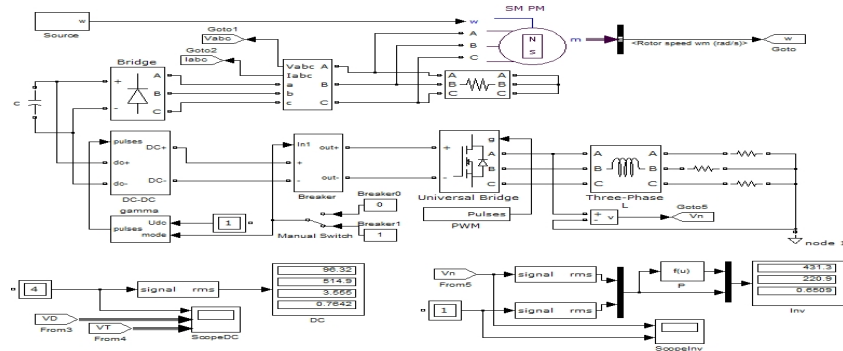


Рис. 3. Matlab-модель ДВУ-ККМ

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кукис В.С., Романов В.А. Двигатель Стирлинга в когенерационных энергетических системах. Издательство Нобель Пресс, Москва, 2013. 246с.
2. Аракелян А.К., Афанасьев А.А. Вентильные электрические машины в системах регулируемых электроприводов: Учебное пособие для вузов: В 2 т. Т.2.-М.:Выш.шк.,2006.-518с.
3. Жуков В.П., Нестерин В.А. Высокомоментные вентильные электродвигатели серии 5 ДВМ. Электротехника №6, 2000. с. 19-21.

4. Плохов И.В., Хитров А.А., Хитров А.И. Стартер - генераторная установка для автономной системы электроснабжения на базе роторно-лопастного двигателя с внешним подводом теплоты. Патент на полезную модель RU №144521. Опубликовано 27.08.2014 г. БИ №24.
5. Хитров А.И., Федотов И.М., Хитров А.А.. Экспериментальный стенд для исследования режимов работы асинхронных и вентильных двигателей современных электроприводов. Известия ТулГУ, Тула, 2010, Т3. ч. 4. с. 247-253.